



Communication à un colloque (Conference Paper)

"Proposition de redéfinition pragmatique des bâtiments net-zéro énergie"

Van Moeseke, Geoffrey ; Attia, Shady Galal Mohamed ;
Massart, Catherine ; Darteville, Olivier ; De Herde, André

Abstract

La notion de NZEB, en tant qu'indicateur de performance, doit répondre à un triple objectif de rigueur scientifique, d'ambition proportionnelle à l'enjeu et de pragmatisme. Nous montrons que la définition actuelle des NZEB ne répond pas de façon optimale à ces 3 exigences. Dès lors, nous proposons une autre approche de la performance énergétique des bâtiments, centrée sur la dissociation des indicateurs et leur évaluation relative aux potentiels et contraintes du projet d'architecture. Plus qu'une redéfinition, le résultat de cet article est l'embryon d'un outil de guidance énergétique parallèle aux étapes de développement d'un projet.

Référence bibliographique

Van Moeseke, Geoffrey ; Attia, Shady Galal Mohamed ; Massart, Catherine ; Darteville, Olivier ; De Herde, André. *Proposition de redéfinition pragmatique des bâtiments net-zéro énergie*. Symposium PassiveHouse (Bruxelles, 05/10/2012).

PROPOSITION DE REDEFINITION PRAGMATIQUE DES BATIMENTS NET ZERO-ENERGIE

GEOFFREY VAN MOESEKE¹, SHADY ATTIA¹, CATHERINE MASSART¹, OLIVIER DARTEVELLE¹, ANDRE DE HERDE¹

¹Architecture et Climat, Université catholique de Louvain, www-climat.arch.ucl.ac.be/
place du Levant 1, B-1348 Louvain-la-Neuve
Phone: +32 10 479152 Fax: +32 10 47 21 42
E-mail: geoffrey.vanmoeske@gmail.com

ABSTRACT

La notion de NZEB, en tant qu'indicateur de performance, doit répondre à un triple objectif de rigueur scientifique, d'ambition proportionnelle à l'enjeu et de pragmatisme. Nous montrons que la définition actuelle des NZEB ne répond pas de façon optimale à ces 3 exigences. Dès lors, nous proposons une autre approche de la performance énergétique des bâtiments, centrée sur la dissociation des indicateurs et leur évaluation relative aux potentiels et contraintes du projet d'architecture. Plus qu'une redéfinition, le résultat de cet article est l'embryon d'un outil de guidance énergétique parallèle aux étapes de développement d'un projet.

1. NZEB : DEFINITIONS ET CRITIQUES

Définitions belges et européennes

Différentes définitions existent pour décrire les Net Zero Energy Building (NZEB) ou des notions proches. Citons l'Union Européenne et la refonte de la directive PEB [1]¹ et en Belgique l'Arrêté Royal de 2010 [2]². Pour un inventaire exhaustif des définitions et traductions régionales rencontrées en Belgique, le lecteur se référera au survey précédemment réalisé par Mlecnik et al [3]. La Tâche 40 'Vers des bâtiments nets zéro-énergie' de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) a compilé les différentes définitions existantes et leurs critiques [4]. Les définitions les plus fréquemment rencontrées travaillent sur base d'un bilan énergétique net annuel, où le bâtiment passe d'un rôle de consommateur à producteur d'énergie en fonction du temps. Des divergences de concept et de méthodologie existent cependant entre les définitions. Aussi l'AIE suggère cinq principes que toute définition

¹ « Un bâtiment dont la consommation d'énergie est quasi nulle (est) un bâtiment qui a des performances énergétiques très élevées déterminées conformément à l'annexe I. La quantité quasi nulle ou très basse d'énergie requise devrait être couverte dans une très large mesure par de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, notamment l'énergie produite à partir de sources renouvelables sur place ou à proximité »

² Le bâtiment doit répondre au standard maison passive et le besoin d'énergie résiduel pour le chauffage et le refroidissement des espaces doit être complètement compensé par une production d'énergie renouvelable sur site

des NZEB devrait intégrer [5, 6, 7] : les paramètres de calcul (conditions frontières physiques, fonctionnelles, climatiques et de confort) doivent être clarifiés ; les règles de pondération entre formes d'énergie doivent être explicitées ; le caractère « net » de la définition doit être précisé : quels éléments sont pris en compte, sur quelle période de temps, ... ; les conséquences en termes de réseau énergétique considérées (équilibres de puissances, interaction avec le réseau) ; les procédures de monitoring et d'accompagnement doivent être précisées.

Questions en suspend et critiques fréquemment rencontrées

Pour le cas particulier de la définition fédérale belge, Mlecnik et al [3] pointent 11 faiblesses, parmi lesquelles nous pensons utile de relever la limitation aux seuls besoins de chaud et de froid, une définition statique du confort liée à la reprise du standard Maison Passive qui n'exploite pas entièrement la norme EN15251, la non prise en compte des ensemble de bâtiments et de programmes autres que les logements, l'oubli de la question de la liaison intelligente au réseau énergétique et des éléments de monitoring ou de garantie de performance.

Ces manquements illustrent bien les faiblesses actuelle du concept NZEB et justifie les recommandations de l'AIE listées plus haut : quels éléments prend-on en compte, selon quelle méthode, à quelle échelle de temps et d'espace, et comment s'assure-t-on de la réalité des performances ? Récemment, le Building Performance Institute Europe (BPIE) a synthétisé ces critiques et y a ajouté les questions suivantes [8] : comment lier l'objectif NZEB avec la politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre et le principe d'optimum économique ? comment assurer la logique interne à ce concept, notamment en faisant la part juste entre réduction des besoins et production renouvelable ? et comment ouvrir ce concept à des évolutions futures, telles que la notion de bâtiments à énergie positive ? Pour répondre à ces challenges, le BPIE propose une standardisation de la méthode de calcul, une juxtaposition d'indicateurs énergétiques et d'émissions de gaz à effet de serre, et la définition d'objectif chiffrés parallèles pour la consommation d'énergie et le taux de couverture renouvelable.

Il ressort de tout ceci que l'approche actuelle :

- (1) manque de clarté dans ce qui est inclut dans l'évaluation,
- (2) manque de clarté dans les conditions frontières de l'évaluation,
- (3) manque de pragmatisme du fait de sa non déclinaison selon les programmes, échelles, etc.,
- (4) est réductrice du fait de l'évaluation d'un seul indicateur énergétique,

(5) est inadéquate du fait de l'absence d'objectifs particuliers pour les sous-problématiques,

(6) est uniquement théorique de fait de l'absence de suivi des consommations réelles.

2. RIGUEUR, AMBITION, PRAGMATISME

Aux critiques et limitations présentées ci-dessus, nous pensons utile d'ajouter que la définition des bâtiments zéro-énergie doit avant tout être un outil pratique destiné à guider le concepteur dans ses choix. Il en découle que cette notion doit répondre à trois caractéristiques: (1) la rigueur scientifique indispensable, (2) l'expression d'un niveau d'ambition proportionnel à l'enjeu, et (3) le pragmatisme, compris comme sa cohérence avec la pratique de terrain. Nous estimons que la définition actuelle n'offre pas une réponse optimale à cette triple exigence.

La rigueur réduit le pragmatisme

Les critiques relevées plus haut ont mis en évidence qu'une limitation aux besoins de chauffage et de refroidissement n'était pas adéquate. Nous pensons qu'il y a aujourd'hui consensus pour considérer que la notion des NZEB devrait intégrer les consommations d'énergies liées à l'éclairage, et aux auxiliaires et l'énergie grise liée aux matériaux et composants mis en œuvre. Pour mieux refléter la réalité, l'évaluation devrait également intégrer d'autres consommations telles que l'énergie consommée par le chantier et le processus de conception en tant que tel, ou encore l'impact du projet sur l'énergie dépensée en transports et infrastructures ou son influence éventuelles sur les comportements énergétiques des habitants.

Sans trancher sur la listes des paramètres à intégrer, force est de constater que nous sommes face à une tendance qui pousse à agréger en une seule évaluation une série d'impacts énergétiques différents. D'une part, l'agrégation des différentes consommations rend la valeur finale difficilement compréhensible. Il devient difficile de se représenter concrètement ce qu'elle représente, et quel est le poids de chaque mesure de performance énergétique dans le résultat final. D'autre part, il est difficile d'obtenir une valeur réaliste avant d'atteindre un stade d'avancement poussé du projet, vu que des choix préliminaires doivent avoir été faits pour chaque élément intervenant dans le calcul. Or, ce sont souvent les premières étapes qui déterminent la performance énergétique, ainsi que la combinaison de la performance énergétique avec la performance économique. La tendance à

l'exhaustivité du calcul énergétique pourrait donc à terme rendre l'évaluation « net zéro-énergie » inopérante comme guide de conception.

L'AIE ne constate pas autre chose en proposant de façon limitée que l'exigence « zéro-énergie » soit accompagnée d'une exigence de besoin maximal d'énergie. Cette recommandation traduit la nécessité, face à la complexification et l'abstraction grandissante de cette notion, de conserver des indicateurs partiels intelligibles.

L'ambition des NZEB est détachée du projet

La recherche d'un niveau « zéro-énergie » reflète une approche sectorielle de l'impact énergétique des bâtiments. Cette ambition peut être acceptée en tant que projection à l'échelle du secteur d'un équilibre énergétique global de nos sociétés, mais rien n'indique que l'équilibre annuel entre production et consommation soit pertinent à l'échelle d'un projet d'architecture. Au contraire, le niveau « net zéro-énergie » génère une iniquité flagrante au niveau du projet individuel, notamment entre les sites bénéficiant d'un fort potentiel d'énergies renouvelables et les autres, ou entre les projets permettant une réduction drastique des besoins et ceux qui ne le peuvent du fait de contraintes propres et justifiées (pensons aux questions de patrimoine remarquable, de capacité d'investissement, etc.). Un niveau d'ambition unique ne peut pas être considéré a priori comme applicable partout. Certaines situations de projet nécessiteront de revoir les ambitions à la baisse face aux contraintes techniques, économiques ou patrimoniales, tandis que d'autres permettront d'aller plus loin que l'équilibre énergétique. Déjà aujourd'hui des projets prétendent à un titre de « bâtiment à énergie positive ».

Dès lors, quel crédit associer à ce niveau d'ambition, sourd à la diversité des situations rencontrées ? A l'opposé, le principe de responsabilité commune mais différenciée du développement durable [9] suggère de considérer chaque projet d'architecture comme un moment particulier, pour lequel un niveau d'ambition nécessairement très ambitieux mais éventuellement toujours différent doit être systématiquement redéfini.

Reconstruire l'approche énergétique au départ du projet

Vu la critique de la notion de bâtiment zéro-énergie ci-dessus, nous proposons d'abord de renoncer à cette appellation. Le terme énergie positive, plus ambitieux mais plus flou et finalement très proche ne trouve pas plus grâce à nos yeux. Nous proposons d'oublier les slogans pour parler simplement de la performance énergétique des bâtiments. Nous définissons cette performance énergétique comme (1) le résultat de la conception et de la

réalisation d'un bâtiment permettant à la fois (2) de faire tendre vers zéro les besoins énergétiques liés à leur occupation et (3) de maximiser la capacité de production d'énergie renouvelable du site (4) tout en usant de moyens dont l'impact énergétique propre tend vers zéro.

Ensuite, nous proposons de reconstruire une démarche d'évaluation de cette qualité énergétique sur base des éléments suivants:

(1) Constatant que cette qualité est dépendante des hommes qui conçoivent, réalisent et habitent les bâtiments, et qu'il est utile pour ces hommes de disposer d'outils pour penser la dimension énergétique du bâtiment, nous proposons de partir de l'exigence de pragmatisme pour définir de tels outils qui soient à la fois rigoureux et reflète d'une ambition appropriée à des situations particulières.

(2) Conscients que le projet d'architecture est une succession de décisions dont beaucoup ont un impact énergétique, nous proposons de calquer la démarche d'évaluation de la qualité énergétique sur la chronologie du projet.

(3) Face au problème d'agrégation d'impacts multiples en un seul indicateur, nous suggérons de centrer la démarche sur l'évaluation d'indicateurs particuliers et non sur une évaluation globale. Il s'agira d'être performant à la fois en termes de réduction des consommations et de production d'énergie renouvelable, sans se focaliser sur une comparaison entre ces deux aspects.

(4) Face au problème du niveau d'ambition non pertinent, nous proposons de réfléchir à un niveau d'ambition adéquat pour des indicateurs intermédiaires propres à chaque décision de l'architecte, chaque indicateur devant disposer d'une échelle propre tenant compte de particularités du projet. Pas de valeur absolue donc, mais des taux de réalisation d'un objectif idéal défini sur base des contraintes du projet. Par exemple, la compacité ne doit pas se mesurer comme V/A_t , mais relativement à la compacité maximale possible pour le volume devant être construit, ce qui revient à comparer l'enveloppe de déperdition à celle d'une sphère de même volume: $0 < A_t / (4.84 * V^{2/3}) < 1$.

Notre proposition de renoncer à l'agrégation d'indicateurs répond de fait à la critique du manque de clarté sur ce qui doit être pris en compte. Ne se contenant plus d'un indicateur unique, la question de la définition de cet indicateur n'a plus de sens. Ceci répond aussi à la critique de non définition d'indicateurs propres aux sous-problématiques. La critique sur le manque de précision des conditions frontières est partiellement levée : notre proposition de définir des niveaux de performance spécifique à chaque décision et de baser cette évaluation sur les conditions particulières permettra souvent de clarifier les modes d'évaluation. L'expression des résultats de ces évaluations comme des taux de réalisation permettra de réaliser des comparaisons entre

projet malgré l'adaptation individuelle des modes d'évaluation. Enfin, notre proposition ne répond pas explicitement à la critique sur le caractère réducteur de la démarche ZEB (limitation à l'énergie), mais permettra aisément l'intégration d'indicateurs parallèles à ceux purement énergétiques.

Dans la suite de cet article, nous proposons une série d'indicateurs liés aux paramètres traditionnellement considérés dans l'évaluation ZEB. Il s'agit là d'un exercice réalisé à titre d'exemple, portant sur une partie limitée de la question énergétique, mais dont la démarche pourrait être étendue.

3. PROJET, DECISIONS ET CONSEQUENCES ENERGETIQUES

Etapas du projet

Le projet d'architecture peut se décomposer en différentes phases. Chacune de ces phases implique des décisions ayant un impact énergétique, comme indiqué en Figure 1.

Nous négligerons les aspects méthodologiques à définir en phase de programmation, pour ne retenir de cette phase que deux aspects : le choix d'un site et la définition du programme. Le choix du site détermine le potentiel absolu de production d'énergie renouvelable, lié uniquement à l'ensoleillement de la parcelle si nous négligeons le potentiel éolien, géothermique et de production de biomasse. La définition du programme est l'occasion de l'inventaire des modes de vies envisagés et de l'estimation des charges internes du projet.

Lors de l'esquisse se déterminent l'implantation, la volumétrie et l'organisation spatiale du projet. Ces éléments conditionnent d'une part l'exposition solaire et le potentiel de production d'énergie renouvelable du bâtiment et d'autre part l'approche climatique de l'architecture. Cette dernière inclut la compacité, la disponibilité de lumière naturelle, la capacité à générer des mouvements d'air naturels, et l'ouverture aux gains solaires hivernaux.

Lors de l'avant projet, le choix des modes constructifs détermine la performance de l'enveloppe, tandis que le choix des techniques détermine la place laissée aux forces naturelles (ex : ventilation hygiénique naturelle estivale), la performance intrinsèque des techniques (ex : pertes de charge du réseau de ventilation mécanique en hiver) et le type d'énergie utilisé (gaz, fuel, biomasse, etc.). Enfin, le choix et le dimensionnement des techniques renouvelables déterminent la valorisation effective du potentiel renouvelable du site.

Les phases suivantes d'évolution du projet, que nous ne considérerons pas ici, impactent principalement la concrétisation des décisions de conception et l'optimisation du concept par confrontation à la réalité du bâtiment construit. Il s'agit d'aspects fondamentaux de la performance énergétique, actuellement oubliés dans les approches NZEB et épinglés par les critiques de l'AIE.

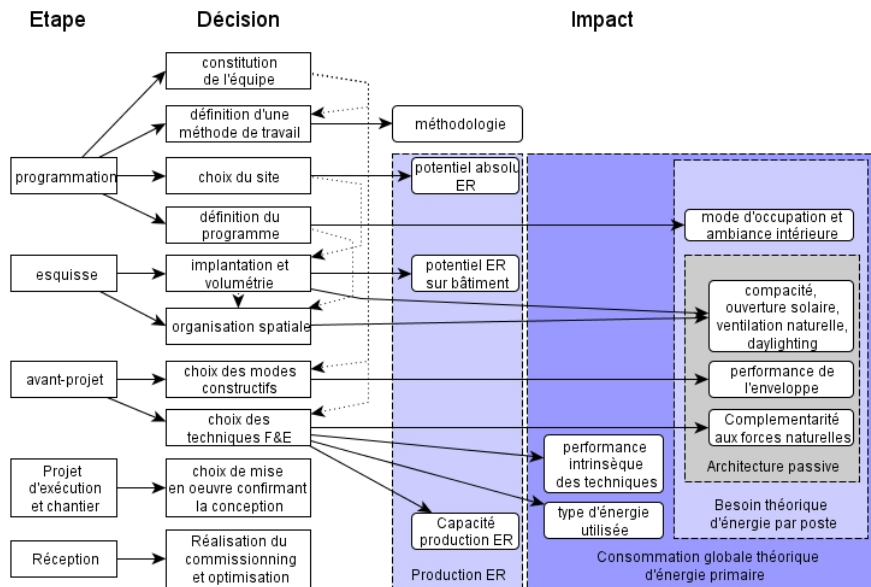


FIGURE 1: ETAPES DE CONCEPTION ET IMPACTS ENERGETIQUES

Conséquence de cette décomposition

Nous proposons dans le Tableau 1 une matrice d'évaluation de la performance énergétique d'un projet. Celle-ci indique à chaque stade de conception quels sont les principaux éléments pouvant faire l'objet d'une évaluation. Ce listing est établi sur la base limitée des décisions et impacts identifiés dans la Figure 1. Parallèlement, nous proposons des indicateurs concrets d'évaluation et la faisabilité de les calculer dans le PHPP. Faute de place, la justification de ces indicateurs ne pourra être développée ici. En outre, des développements complémentaires sont nécessaires pour asseoir leur pertinence, aussi ont-ils principalement une valeur d'exemple. Des objectifs idéaux sont proposés. La définition d'objectifs intermédiaires pourrait être réalisée sur base de benchmarks des meilleures pratiques actuelles.

Paramètre	Objectif	Evaluation PHPP ?
Evaluation au stade de la programmation		
Potentiel solaire = Irradiation totale annuelle sur parcelle	Donnée du site : I_{parcelle} [kWh/a] $= I_{\text{solaire, global}} * S_{\text{parcelle}}$	Oui si ajoute la surface de la parcelle
Niveau de gains internes	Donnée du programme : Q_{int} [Wh/a]	feuille « apports internes » et suivantes
Conditions de confort souhaitées	Données du programme : [°C, %HR, lx]	-
Evaluation au stade de l'esquisse		
Potentiel solaire du bâtiment = Irradiation annuelle sur murs/toitures	$I_{\text{bâtiment}}$ [kWh/a] = $\sum_{\text{wall}} I_{\text{solaire, wall}} * S_{\text{wall}}$ $0 < I_{\text{bâtiment}} / I_{\text{parcelle}} < 1$ à maximiser	Oui si on décompose les parois selon leur orientation
Compacité relative	$0 < A_t / (4.84 * V^{2/3}) < 1$ à maximiser	Oui
Ouverture solaire : bilan énergétique des fenêtres	$(Q_s - Q_{t, \text{window}}) / A_{\text{re}}$ [kWh/m²a] à maximiser	feuille « fenêtres »
Potentiel de ventilation naturelle	Evaluation qualitative de la capacité de l'air à circuler naturellement dans l'ensemble des locaux $0 < \text{Part du temps d'occupation respectant plage UDI [10]} < 1$ à maximiser	Non
Juste quantité de lumière naturelle	approx : $0 < \text{Part du temps d'occupation avec éclairage artificiel à pleine charge} < 1$ à minimiser	Nécessite logiciel spécifique type Daysim Feuille « électricité non résidentielle ». Ratio colonnes AC/AA
Evaluation au stade de l'avant-projet		
Performance relative de l'enveloppe	$0 < U_m / U_{m, \text{peb}} < 1$ à minimiser	feuille « surface »
Caractère dynamique de l'enveloppe	$0 < \text{facteur ombrage hiver} / \text{facteur ombrage été} < 1$ à minimiser	Feuilles « ombrage » et « ombrage été »
Possibilité de ventilation hybride (mécanique en support au naturel)	$0 < \text{PerteCharge}_{\text{réseau hygiénique}} / \text{Débit hygiénique}$ [Pa/(m³/h)] à minimiser	Non
Indicateur global du caractère passif : besoin de chauffage et froid	$0 < Q_H$ à minimiser [kWh/m²] $0 < Q_K$ à minimiser [kWh/m²] ou $0 < \text{risque surchauffe} / 100 < 1$ à minimiser	Feuilles « besoin de chauffage », « besoin frigorifique » et « été »
Performance des techniques et choix des vecteurs énergétiques	Evaluation par poste : consommation primaire / besoin d'énergie ³ . A minimiser.	Non
Energie solaire valorisée en production ER	$0 < I_{\text{valorisé}} / I_{\text{bâtiment}} < 1$ à maximiser	Non

TABLE I : Indicateurs de la qualité énergétique aux différentes phases de conception

³ Pour la ventilation, le besoin [Wh] = débit [m³/s]*perte de charge [Pa]*temps [h]
Pour l'éclairage, nous proposons de définir le besoin comme le défaut d'éclairement naturel durant l'occupation, soit $\int_{\text{période occupation}} \max((E_{\text{cl, recommandé}}[lx] - E_{\text{cl, nat}}[lx]), 0) [lx.h]$

4. CONCLUSION

Nous proposons dans cet article de dépasser la notion de NZEB. La définition de la performance énergétique faite ici suggère de renoncer à la recherche d'équilibre entre consommation et production d'énergie renouvelable. Ces deux aspects relèvent en effet de logiques différentes et de décisions distinctes. Nous avons également pointé en introduction le caractère inéquitable à l'échelle d'un projet d'une approche voulant équilibrer ou même comparer ces deux valeurs. Dans notre vision, il ne faut pas chercher à équilibrer des impacts négatifs (consommation) et positifs (production), mais chercher à minimiser les uns et à maximiser les autres. Nous soulignons que l'évaluation juste de ces efforts doit se faire relativement au potentiel du site et aux spécificités du programme, et non en valeur absolue. Cette logique appliquée ici à la question énergétique pourrait être étendue à d'autres questions environnementales de l'architecture telles que la gestion de l'eau ou la biodiversité.

La décomposition proposée en phases de conception et leur association à des indicateurs de qualité spécifiques permet de disposer d'éléments de guidance pertinents à chaque phase du projet. Accompagnés de valeurs cibles non proposées dans cet article, ces indicateurs peuvent constituer un guide plus sûr vers la performance énergétique que l'actuelle démarche NZEB de vérification tardive de l'équilibre production-consommation. Il n'en reste pas moins vrai qu'une évaluation synthétique, telle que la consommation globale d'énergie primaire, reste pertinente dans un rôle de validation globale de la qualité et de facilité de communication.

Oublis

D'abord, cet article se centre sur la performance énergétique, laissant de côté les nombreuses autres dimensions de la performance environnementale. Ensuite, deux éléments majeurs de la performance énergétique n'ont pas été évoqués dans cet article, par soucis de concision. Il s'agit de l'énergie grise, et du rôle de l'occupant.

L'énergie grise pourrait être ajoutée à la matrice, à la fois dans la phase avant-projet, où le choix des modes constructifs doit impliquer une analyse LCA, et en phases projet d'exécution et chantier, où la conception et réalisation des détails et assemblages doit préserver la qualité environnementale d'un système, notamment sa capacité à être déconstruit et sa recyclabilité.

Concernant le rôle de l'occupant, nous souhaitons souligner que l'objectif de la conception et réalisation du projet d'architecture doit être la performance réelle, à savoir l'énergie effectivement utilisée par l'occupant, et non la performance théorique. Cette anticipation du réel implique une intervention méthodologique (démarches participatives, processus de 'post occupancy evaluation') et une évaluation de la résilience du projet face à des modifications d'usage ou de conditions extérieures, par exemple climatiques.

REFERENCES

1. EPBD, 2010. Directive of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (recast), Inter-institutional File: 2008/0223 (COD), [http://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2009_2014/documents/clc/cons_cons\(2010\)05386\(rev3\)/cons_cons\(2010\)05386\(rev3\)_en.pdf](http://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2009_2014/documents/clc/cons_cons(2010)05386(rev3)/cons_cons(2010)05386(rev3)_en.pdf), consulted: 14th June 2010.
2. Belgisch Staatsblad – Moniteur Belge, 2010. 22.09.2010, Art.145, pp. 58666
3. Mlecnik E., Attia A., Van Loon S.. Net zero energy building: A review of current definitions and definition development in Belgium. Passive house Symposium 2011
4. IEA SHC Task 40, 2010. Towards Net Zero Energy Solar Buildings. <http://www.iea-shc.org/task40>
5. Marszal, A., Heiselber, P. et al., 2011. Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies, Energy and Buildings, accepted and in press.
6. Sartori, et al., 2010. Criteria for Definition of Net Zero Energy Buildings, In the Proceedings of EuroSun, Austria.
7. Torcellini, P., et al. M., 2006. Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition, ACEEE Summer Study, Californie
8. BPIE, 2011, Principles for nearly zero-energy buildings, Paving the way for effective implementation of policy requirements, BPIE, Brussels.
9. Commission interdépartementale du développement durable (CIDD), 2000. Plan Fédéral pour le Développement Durable 2000 – 2004
10. Nabil A, & Mardaljevic J. (2005). Useful Daylight Illuminance: A New Paradigm to Access Daylight in Buildings. Lighting Research & Technology, 37(1), 41-59.